

高温下 600 MPa 级高强钢筋力学性能试验研究

孙传智¹, 王可卿¹, 乔 燕¹, 董学娥²

(1. 宿迁学院 建筑工程系, 江苏 宿迁 223800; 2. 宿迁市住房和城乡建设局, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 为了研究高温下 600 MPa 级高强钢筋的力学性能, 通过拉伸试验, 研究了 600 MPa 级高强钢筋在 20 ℃、150 ℃、225 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃和 800 ℃等 9 种不同温度下应力-应变曲线、弹性模量、屈服强度、极限强度、断面收缩率和伸长率等力学性能的变化规律。试验表明: 随着温度的升高, 钢筋断口剪切唇区逐渐规则; 当温度为 150 ℃时, 600 MPa 级高强钢筋应力-应变曲线仍然存在屈服台阶, 而温度大于 225 ℃时无屈服台阶; 600 MPa 级高强钢筋屈服强度、极限强度以及弹性模量随温度的升高而逐渐减小, 伸长率随温度的升高而增大, 断面收缩率随温度的升高是先增大后减小。最后基于试验数据, 得到了高温下 600 MPa 级高强钢筋弹性模量、屈服强度、极限强度、断面收缩率和伸长率等力学参数随温度变化的计算公式以及高温本构模型。

关键词: 高强钢筋; 高温; 力学性能; 高温本构模型

中图分类号: TU511.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0355-07

Experimental study on material properties of 600 MPa grade high strength rebar steel at high temperature

SUN Chuanzhi¹, WANG Keping¹, QIAO Yan¹, DONG Xuee²

(1. Department of Architecture Engineering, Suqian College, Jiangsu Suqian 223800, China;

2. Suqian Housing and Urban-Rural Development Bureau, Jiangsu Suqian 223800, China)

Abstract: The tensile test of 600 MPa grade high strength rebar steel at high temperature was conducted to study the mechanical properties at various temperatures (20 ℃, 150 ℃, 225 ℃, 300 ℃, 400 ℃, 500 ℃, 600 ℃, 700 ℃, 800 ℃, respectively), and the mechanical properties, including tensile-strain relationships, elastic modulus, yield strength, ultimate strength, percentage elongation after fracture, average elongation percentage, were obtained. Experimental results indicate that the shear lip area of fracture is gradually regulated with the increase of temperature. When the temperature is less than or equal to 150 ℃, the stress-strain curve of 600 MPa grade high strength rebar steel have obvious yielding step, and when the temperature is greater than 225 ℃, there is no yielding step. The yield strength, ultimate strength, and elastic modulus decrease with the temperature increasing, meantime, percentage elongation after fracture, average elongation percentage of 600 MPa grade high strength rebar steel increase with the temperature increasing. Based on the experimental results, the formulae predicting yield strength, ultimate strength, elastic modulus, average elongation percentage of 600 MPa grade high strength rebar steel affected by temperature and the high-temperature constitutive model at high temperature were proposed.

Key words: high strength steel; high temperatures; mechanical properties; high-temperature constitutive model

火灾是造成人类伤亡和经济损失的主要灾害之一。对于钢筋混凝土结构, 如果在其运营期间发生火灾, 钢筋和混凝土的力学性能均发生退化, 结构承载能力降低, 可能导致结构不安全。目前, 国内外学者针对高温下的屈服强度低于 500 MPa 的钢筋^[1-4]、预应力钢绞线^[5-7]和混凝土^[8-10]等材料的力学性能进行了大量试验研究。其中, 吕彤光^[1]对建筑结构常用的 5 种等级 (I ~ V) 在 20~800 ℃

范围内的强度、应力-应变曲线、弹性模量和应力下的变形以及短期徐变等进行深入研究; 钮宏^[2]对 40 根普通钢筋在 100~800 ℃范围内的不同温度和荷载同时作用下的强度、变形、弹性模量和应力-应变关系等进行了研究; 王孔藩^[3]进行了圆钢、螺纹钢、冷拔和冷轧扭 4 种钢筋高温下力学性能的试验研究, 同时进行了螺纹钢筋高温冷却后力学性能的试验研究, 并与室温下钢筋力学性能进行了

收稿日期: 2018-03-26 修改稿日期: 2019-05-10

基金项目: 2015 年江苏省第十二批六大人才高峰项目 (2015-JZ-019), 宿迁市科技支撑计划项目 (Z2018098); 江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”科研项目

第一作者: 孙传智 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗震与大跨桥梁承载力评估研究。E-mail: schzh_xzh@163.com

对比分析;肖建庄^[4]对 HRBF500 钢筋在高温下的力学性能进行试验研究,得到了高温下 500 MPa 细晶粒钢筋屈服强度、极限强度和弹性模量随温度变化的计算公式以及高温本构模型;文献[5~7]进行了预应力钢绞线在不同温度下的力学性能试验,得到了可用于理论分析的钢绞线高温性能模型和钢丝的应力-应变关系。

600 MPa 级高强钢筋是新一代建筑钢材,相比较 HRB400 和 HRB500 钢筋,它集热轧螺纹钢的外形尺寸、精轧螺纹钢的强度级别、低强度钢筋的伸长率为一体,满足了我国现行的建筑规范特别是对伸长率的技术要求。这种钢筋强度高,屈服强度标准值为 600 MPa,设计值可达到 480 MPa,在高烈度抗震设防地区采用这种钢筋可以节省钢筋用量,梁柱节点钢筋明显减少,现场容易施工。国内学者针对 600 MPa 级高强钢筋混凝土黏结滑移关系^[11]和配置该类型钢筋的混凝土构件力学性能^[12-14]进行了研究,该类型钢筋在实际工程中得到越来越多的应用。但是对其高温下的力学性能研究却几乎没有。

基于上述原因,本文以 600 MPa 级高强钢筋作为研究对象,共进行了 9 组 27 根 600 MPa 级高强钢筋在不同温度下的力学性能试验,得到了不同温度下 600 MPa 级高强钢筋的应力-应变关系,分析了屈服强度、极限强度、弹性模量、断后伸长率和截面收缩率等变化规律,并得到了高温下 600 MPa 级钢筋屈服强度、抗拉强度、弹性模量、断面收缩率和伸长率的计算公式。

1 试验方案

试验在江苏奇纳新材料有限公司试验室完成,采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 UTM5000 型电子万能试验机,最大加载 1 00 kN,升温设备是圆柱形加热工作炉,采用微电脑控制系统,炉外径 450 mm,炉高 600 mm,其最高温度可达到 1 300 °C,控制精度为 1 °C,炉内恒温时间可自动控制,炉膛内壁上、中、下布设 3 个温度传感器,保证炉内温度上、中、下空间一致,炉内上、中、下温度可以控制在 ± 1 °C 范围,温度传感器距离试件外径距离 20 mm。试件加热至预设温度并恒温 20 分钟后开始加载,加载速率为应变控制,速率为 0.05 min^{-1} 。

试件母材采用江苏沙钢集团有限公司生产的

600 MPa 级高强热轧带肋钢筋,肋为月牙形,直径为 25 mm,每组 3 根,共 9 组,其中常温 1 组,其余 8 组加热高温,温度分别为 150 °C、225 °C、300 °C、400 °C、500 °C、600 °C、700 °C 和 800 °C。试件制作参考《金属材料高温拉伸试验方法》(GB/T 228.2-2015),尺寸如图 1 所示,图中尺寸单位均为 mm。在同一批次钢筋中取 3 根试件,进行原材料静力拉伸试验,各参数取平均值,得到常温下 600 MPa 级力学性能为:极限强度为 864 MPa,屈服强度为 663 MPa,伸长率为 21.9%,断面收缩率为 43.6%,弹性模量为 $2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

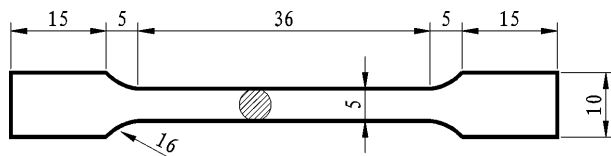


图 1 试件尺寸图(单位: mm)

Fig. 1 Size of specimen(Unit: mm)

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

不同高温下,钢筋试件的表面颜色和颈缩现象等表现特征如图 2 所示,试件表面颜色随着温度的升高逐渐加深,在 150 °C 和 225 °C 时试件表面基本无变化,呈银白色,300 °C 时试件表面颜色呈较浅的金黄色,400 °C 和 500 °C 试件表面颜色呈蓝黑色,600 °C 试件表面颜色呈蓝黑色,黑色偏重,700 °C 和 800 °C 时试件表面颜色呈黑色。在小于 400 °C 时断裂声为脆响,500 °C 和 600 °C 时声音变弱,700 °C 和 800 °C 发生破坏时基本没有声音。从图 2 中可以看出,当温度为 150~700 °C 时,试件破坏断口呈典型的杯椎状断口,且随着温度的升高断口剪切唇区逐渐规则,低于 400 °C 时,剪切唇区局部位置剪切唇尺寸较大,呈刀片形;高于 400 °C 时,断口剪切唇区较规则;而温度达到 800 °C 时,试件断口较整齐,试件表面有横向龟裂纹。

图 3 为试件不同温度下拉断后试件纵向方向 400 倍金相组织,从图中可以看出:晶体的取向分布明显偏离随机分布状态,呈现一定的规则性,即呈现明显的织构现象;室温至 700 °C 金相的基本组织为珠光体+铁素体,而 800 °C 时发生奥氏体转变,极少量渗碳体开始溶解。

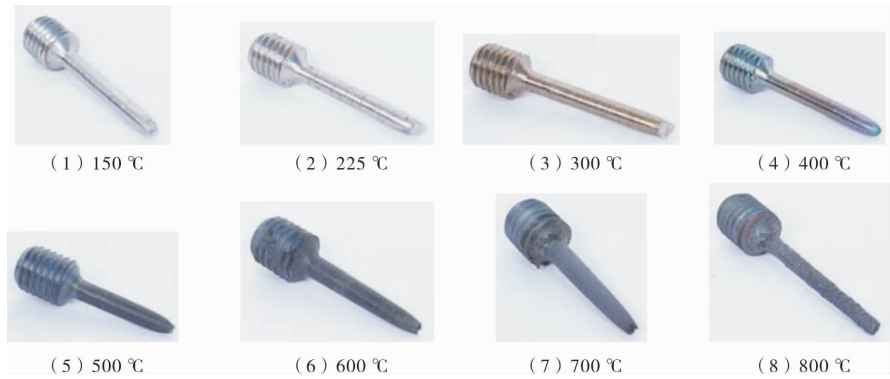


图 2 拉断后试件
Fig. 2 Broken specimen

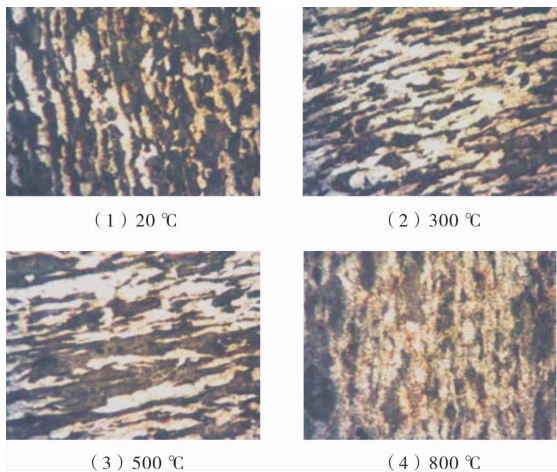


图 3 拉断后试件金相组织
Fig. 3 Macroscopic fracture of broken specimen

2.2 试验数据分析

实测得到 600 MPa 级高强钢筋经历不同加热温度时的应力-应变曲线, 如图 4 所示, 从中可以看出, 当温度为 150 °C 时, 600 MPa 级高强钢筋仍然存在屈服阶段, 但是当温度大于等于 225 °C 时, 600 MPa 级高强钢筋无屈服阶段. 因为室温下晶界和位错周围的柯氏气团对位错滑移有阻碍作用钢铁材料才会出现屈服现象, 温度升高时, 阻碍作用减小, 屈服现象随之逐渐减小至消失. 随着温度的升高, 钢筋拉断时的应变越来越大, 这是因为

高温条件下, 原子扩散能力增大, 材料中空位数量的增多以及材料变形机制增多, 使材料易发生塑性变形, 表现为强度降低, 塑性变形量增加, 即应变增大.

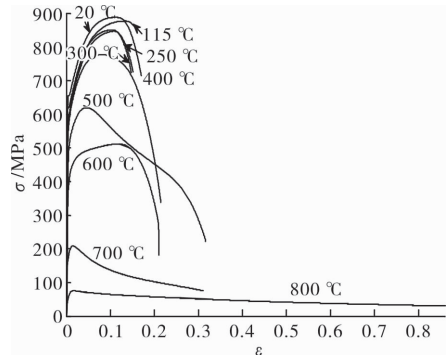


图 4 不同温度下 600 MPa 级高强钢筋
应力-应变曲线图

Fig. 4 Stress-strain curve of 600 MPa grade high strength rebar steel at different temperatures

利用应力-应变曲线得到不同温度下的极限抗拉强度、屈服强度、极限应变、伸长率和断面收缩率等力学参数, 如表 1 所示. 其中当温度大于 300 °C 时, 屈服强度的计算方法参考文献[15]方法进行取值, 表中数值均为 3 个试件所得结果平均值.

表 1 不同温度下的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters at different temperature

序号	温度/°C	极限强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	断面收缩率/%	伸长率/%	极限应变
1	20	864	663	204 736	43.6	21.9	0.151 9
2	150	858	631	196 133	44.3	22.2	0.148 3
3	225	852	615	187 290	48.3	21.6	0.160 0
4	300	823	592	179 037	53.9	22.0	0.154 9
5	400	744	551	163 431	67.6	24.8	0.095 9
6	500	630	513	158 968	80.5	32.3	0.062 1
7	600	520	440	139 170	70.5	36.9	0.034 1
8	700	222	189	59 416	68.5	54.2	0.025 8
9	800	77	73	22 862	65.2	132.7	0.021 2

从表(1)可以看出, (1)当温度小于 225 °C 时, 600 MPa 级高强钢筋极限强度变化较小, 300 °C 时降至常温的 93.7%, 400 °C 时降至常温的 86.1%, 当温度超高 600 °C 后, 极限强度急剧降低, 700 °C 时降至常温的 25.7%, 800 °C 时降至常温的 8.9%, 极限应变在 300 °C 之前, 变化较小, 而超过 400 °C 之后, 极限应变随着温度的升高而降低, 800 °C 时为 0.0212. (2)当温度小于 225 °C 时, 600 MPa 级高强钢筋屈服强度变化较小, 300 °C 时降至常温的 93.7%, 400 °C 时降至常温的 86.1%, 800 °C 时降至常温的 8.9%. 屈服应变随温度变化而变动, 但差别不大. (3)当温度小于 225 °C 时, 600 MPa 级高强钢筋弹性模量变化较小, 225 °C 时降至常温的 91.5%, 300 °C 时降至常温的 87.5%, 400 °C 时降至常温的 79.8%, 500 °C 时降至常温的 77.6%, 当时温度超高 500 °C 后, 弹性模量降低较快, 800 °C 时降至常温的 11.2%. (4)当温度小于 400 °C 时, 随着温度的升高, 600 MPa 级高强钢筋伸长率变化较小, 而超过 500 °C 后, 伸长率增加较快, 800 °C 时升至常温的 607%. (5)随着温度的升高, 600 MPa 级高强钢筋断面收缩率是先升高后降低, 500 °C 时是常温时的 184.6%, 800 °C 时是常温时的 149.5%. 从图 4 可以看出, 当温度低于 500 °C, 颈缩区范围较小, 而温度高于 600 °C 时, 颈缩区范围明显增大, 800 °C 高温作用下试件沿纵向方向各截面直径基本一致, 断面收缩率在 600 °C 以后会降低是因为温度越高, 塑性变形不局限在断裂处, 试棒整体越容易发生塑性变形. 作用在试棒上的应力被分散, 材料整体收缩增大, 断口伸缩率相对于 300~500 °C 时减小. (6)随着温度的升高, 600 MPa 级高强钢筋极限应变变化较大, 随着温度的升高而降低, 800 °C 时最小, 为 0.021 2, 只有常温状态下的 13.96%. (7)高温下 600 MPa 级高强钢筋极限强度、屈服强度、弹性模量的试验值与其他学者所建议计算模型取值趋势基本一致, 但是取值相差较大, 其中屈服强度、弹性模量的试验值与其他学者所建议计算模型取值比较如图 5~图 6 所示, 从图中可以看出, 当温度大于 500 °C 后, 600 MPa 级高强钢筋的屈服强度和弹性模量折减系数较大. 600 MPa 级高强钢筋在高温下的伸长率与文献[4]研究结果相差较大, 600 MPa 级高强钢筋随着温度的升高而增加, 在 800 °C 时的伸长率为 132.7%, 而 HRBF500 钢筋变化无规律, 在 800 °C 时的伸长率最大, 为 26%.

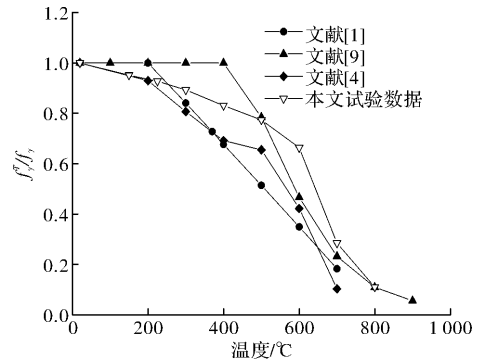


图 5 不同温度下 600 MPa 级高强钢筋屈服强度折减系数

Fig. 5 Reduction factors of yield strength of 600 MPa grade high strength rebar steel at different temperatures

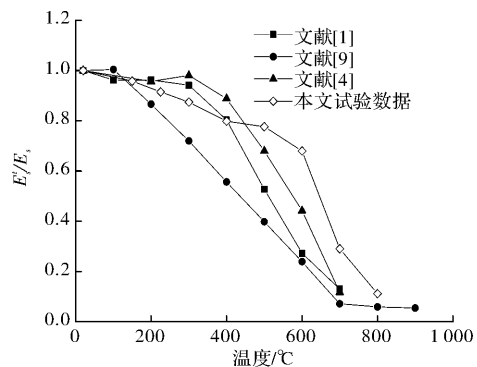


图 6 不同温度下 600MPa 级高强钢筋弹性模量折减系数

Fig. 6 Reduction factors of elastic modulus of 600 MPa grade high strength rebar steel at different temperatures

2.3 高温下 600 MPa 级高强钢筋力学模型

对高温下 600 MPa 级高强钢筋的极限强度、屈服强度、弹性模量、伸长率、断面收缩率和极限应变随温度变化的数据进行拟合, 得到 $20\text{ °C} \leq T \leq 800\text{ °C}$ 时 600 MPa 级高强钢筋力学性能参数拟合表达式, 拟合结果如下.

(1) 极限强度

$$\frac{f_u^T}{f_u} = 1 / (1 + 24.8 (\frac{T-20}{1000})^{5.94}), \quad R^2 = 0.9750 \quad (1)$$

(2) 屈服强度

$$\frac{f_y^T}{f_y} = -2.69279 \times 10^{-9} \times T^3 + 1.32172 \times 10^{-6} \times T^2 - 4.9771 \times 10^{-4} \times T + 1.0059, \quad R^2 = 0.9685 \quad (2)$$

(3) 弹性模量

$$\frac{E_s^T}{E_s} = -3.1289 \times 10^{-9} \times T^3 + 1.96 \times 10^{-6} \times T^2 - 7.3852 \times 10^{-4} \times T + 1.0179, \quad R^2 = 0.9507 \quad (3)$$

(4) 伸长率

$$\frac{\psi_u^T}{\psi} = 1 + 36 \left(\frac{T-20}{1\,000} \right)^{7.93}, R^2 = 0.987\,4 \quad (4)$$

(5) 断面收缩率

$$\frac{\delta_u^T}{\delta} = \begin{cases} 1 + 4.64 \left(\frac{T-20}{1\,000} \right)^{2.29} \\ R^2 = 0.992\,4, 20\,^{\circ}\text{C} \leq T \leq 500\,^{\circ}\text{C} \\ 3.841\,7 \times 10^{-6} \times T^2 - 0.006\,09T + 3.921\,7 \\ R = 0.966\,8, 500\,^{\circ}\text{C} < T \leq 800\,^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

(6) 极限应变

$$\frac{\epsilon_u^T}{\epsilon_u} = \frac{1}{1 + 42.27 \left(\frac{T-20}{1\,000} \right)^{4.72}}, R^2 = 0.972\,3 \quad (6)$$

式中: f_u^T 、 f_y^T 、 E_s^T 、 ψ_u^T 、 δ_u^T 和 ϵ_u^T 分别为不同温度下极限强度、屈服强度、弹性模量、伸长率、断面收缩率和极限应变; f_u 、 f_y 、 E_s 、 ψ 、 δ 和 ϵ 分别为常温下 600 MPa 级高强钢筋的极限强度、屈服强度、弹性模量、伸长率、断面收缩率和极限应变,可以看出,拟合优度 R^2 均大于 0.95,说明采用拟合得到的公式能较精确表达高温下 600 MPa 级高强钢筋的力学参数. 高温下 600 MPa 级高强钢筋极限强度、屈服强度、弹性模量、伸长率、断面收缩率和极限应变的试验值与建立的模型比较如图 7 所示.

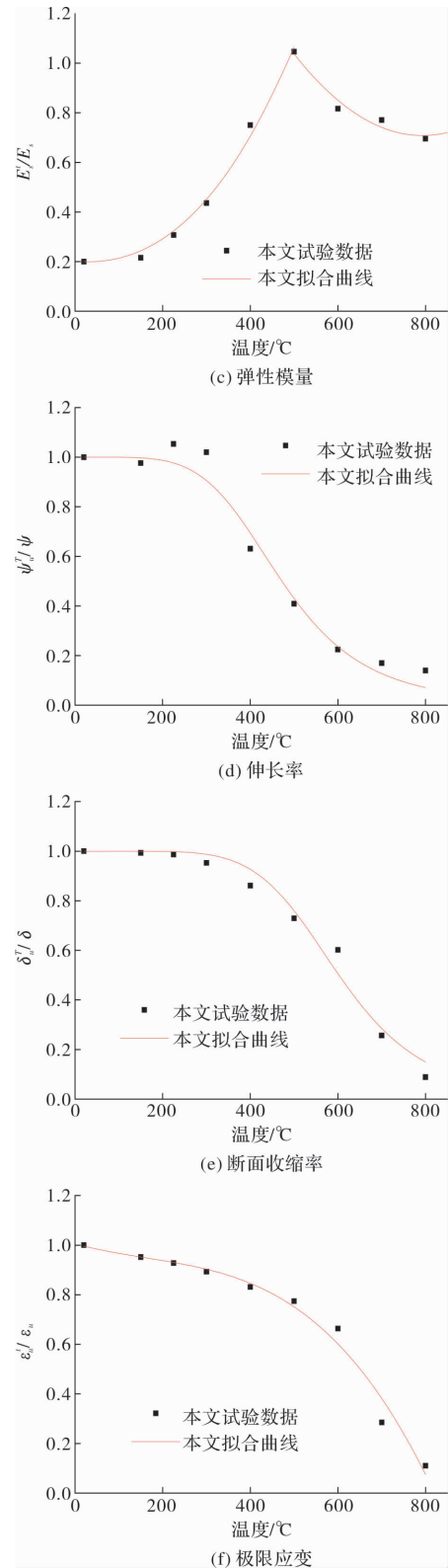
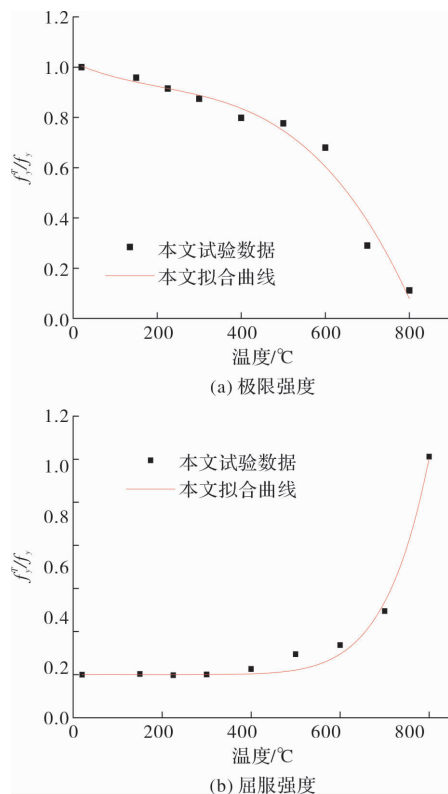


图7 高温下600 MPa级高强钢筋力学参数模型和试验值
Fig.7 Mechanics parameter model and experimental values of 600 MPa grade high strength rebar steel at high temperature

3.4 高温下600 MPa级高强钢筋本构模型

ϵ_y^T 由屈服应变和弹性模量反算可得到,可知 ϵ_y^T 随温度变化不大,取各种温度下的平均值,即

ϵ_y^T , 而极限应变 ϵ_u^T 随温度升高而减小, 高温下钢筋的极限应变 ϵ_u^T 如表 1 所示, 则利用试验数据拟合得到下 600 MPa 级高强钢筋在不同温度时的极限应变表达式, 如公式(6)所示.

高温下钢筋或钢丝的应力-应变曲线的计算模型可采用折线加曲线模型^[4]和两折线模型^[7], 这两个模型均分为屈服前的弹性段和屈服后的强化段, 只是强化阶段表达方式有所不同. 考虑到工程应用的简便, 本文采用两折线模型, 则高温下 600 MPa 级高强钢筋的应力-应变曲线图形如图 8 所示.

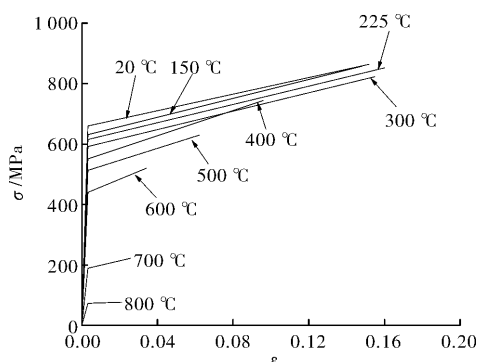


图 8 高温下 600 MPa 级高强钢筋的应力-应变回归曲线

Fig. 8 Model stress-strain curves of 600 MPa grade high strength rebar steel at high temperature

不同温度下二折线模型采用统一的计算表达式, 如式(8)所示.

$$\begin{cases} \sigma[T, \epsilon(T)] = E_s^T \times \epsilon(T) & \epsilon(T) \leq \epsilon_y \\ \sigma[T, \epsilon(T)] = f_y^T + E_{sh}(T) \times (\epsilon - \epsilon_y) & \epsilon_y < \epsilon(T) \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (7)$$

式中, E_s^T 是各个温度下钢筋的弹性模量, N/mm²; $E_{sh}(T)$ 是温度不同时钢筋进入弹塑性阶段后的切线模量, N/mm².

4 结论

本文以 600 MPa 级高强钢筋作为研究对象, 进行了 9 组共 27 根 600 MPa 级高强钢筋在不同温度下的力学性能试验, 针对试验数据进行了分析, 主要结论如下:

(1) 随着温度的升高, 600 MPa 级高强钢筋高温下的屈服强度、极限强度、弹性模量、断面收缩率、伸长率和极限应变等力学性能变化规律不一. 极限强度在 400 °C 时明显降低约, 温度超高 600 °C 后, 极限强度急剧降低; 屈服强度在 300 °C 时低于 600 MPa, 为 592 MPa; 断面收缩率随温度

的升高是先升高后降低, 在 500 °C 时达到峰值; 伸长率是随着温度的升高而增加, 超过 500 °C, 伸长率增加较快.

(2) 高温下 600 MPa 级高强钢筋的极限强度、屈服强度和弹性模量等力学性能退化规律与其它低强度钢筋退化规律基本一致, 但是高温下 600 MPa 级高强钢筋和 HRBF500 钢筋的伸长率变化规律相差较大, 600 MPa 级高强钢筋随着温度的升高而增加, 而 HRBF500 钢筋随着温度的升高变化无规律, 差别较大.

(3) 不同温度下拉断后晶体分布偏离随机分布状态, 呈现明显的织构现象; 室温至 700 °C 时基本组织为珠光体+铁素体; 800 °C 时开始发生奥氏体转变, 极少量渗碳体开始溶解.

(4) 得到了高温下 600 MPa 级高强钢筋的屈服强度、极限强度、弹性模量、断面收缩率、伸长率和极限应变等力学参数与温度的关系表达式, 并建议了其高温下的本构模型.

参考文献 References

- [1] 吕彤光, 时旭东, 过镇海. 高温下 I~V 级钢筋的强度和变形试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1996, 24(S1):11-17.
LÜ Tongguang, SHI Xudong, GUO Zhenhai. Experimental study of strength and deformation of I~V grade steel bars at high temperatures[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 1996, 24(S1):11-17.
- [2] 钮宏, 陆洲导, 陈磊. 高温下钢筋与混凝土本构关系的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1990, 18(3):287-297.
NIU Hong, LU Zhoudao, CHEN Lei. An experimental study of constitutive relationship between reinforced bar and concrete under elevated temperature [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1990, 18(3):287-297.
- [3] 王孔藩, 许清风, 刘挺林. 高温下及高温冷却后钢筋力学性能的试验研究[J]. 施工技术, 2005, 34(8):3-5.
WANG Kongfan, XU Qingfeng, LIU Tinglin. Experimental research on mechanics performance of steel bar after high temperature and cooled down from high temperature[J]. Construction Technology, 2005, 34(8):3-5.
- [4] 肖建庄, 代媛媛, 赵勇, 等. 500MP 细晶粒钢筋高温下

- 的应力-应变关系[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 276-282.
- XIAO Jianzhuang, DAI Yuanyuan, ZHAO Yong, et al. Stress-strain relationship of HRBF500 at high temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(3): 276-282.
- [5] 周焕廷, 聂河斌, 李国强, 等. 高温作用下1860级预应力钢绞线蠕变性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 123-129.
- ZHOU Huanting, NIE Hebin, LI Guoqiang, et al. Experimental research on creep properties of prestressed steel strand in 1860 MPa at high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6): 123-129.
- [6] 周焕廷, 李国强, 蒋首超. 高温下钢绞线材料力学性能的试验研究[J]. 四川大学学报(工科学版), 2008, 40(5): 106-110.
- ZHOU Huanting, LI Guoqiang, JIANG Shouchao. Experimental studies on the properties of steel strand at elevated temperatures[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(5): 106-110.
- [7] 陈礼刚, 袁建东, 李晓东. 高温下预应力钢丝的应力应变关系[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(4): 47-50.
- CHEN Ligang, YUAN Jiandong, LI Xiaodong. The stress-strain curve of prestressed steel wires at elevated temperature[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(4): 47-50.
- [8] 陶津, 柳献, 袁勇, 等. 高温下自密实混凝土强度和变形性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 738-743.
- TAO Jin, LIU Xian, YUAN Yong, et al. Experimental investigation on strength and deformation of self-compacting concrete at elevated temperature[J]. Journal of TONGJI University (Natural Science), 2009, 37(6): 738-743.
- [9] 范飞林, 许金余, 李志武, 等. 高温下混凝土动态力学特性试验[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(3): 22-27.
- FAN Feilin, XU Jinyu, LI Zhiwu, et al. Experiment for dynamic mechanical properties of concrete at high temperatures[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(3): 22-27.
- [10] 金凤杰, 许金余, 范飞林, 等. 钢纤维混凝土的高温动态强度特性[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(4): 683-686.
- JIN Fengjie, XU Jinyu, FAN Feilin, et al. Strength property of steel fiber reinforced concrete at elevated temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(4): 683-686.
- [11] 李艳艳, 李晓清, 苏恒博. 600 MPa 高强钢筋与混凝土的粘结锚固性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 19-25.
- LI Yanyan, LI Xiaoqing, SU Hengbo. Experimental analysis of bond-anchorage properties between 600 MPa high strength reinforcement and concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(2): 19-25.
- [12] 李强, 戎贤, 李艳艳. 配置 HRB600 钢筋的部分预应力混凝土梁疲劳试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 8-12.
- LI Qiang, RONG Xian, LI Yanyan. Experimental study on fatigue behavior of partially prestressed concrete beams with HRB600 steel bars[J]. Building Structure, 2016, 46(2): 8-12.
- [13] 郭蓉, 朱凯. 配置 600 MPa 级高强钢筋混凝土剪力墙的抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 34-39.
- GUO Rong, ZHU Kai. Experimental research on seismic behavior of RC shear wall with 600 megapascal high-strength reinforced bars[J]. Industrial Construction, 2017, 47(6): 34-39.
- [14] 戎贤, 段微微, 王浩. 配置 600 MPa 级高强钢筋 T 形柱抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 148-154.
- RONG Xian, DUAN Weiwei, WANG Hao. Experimental analysis of seismic behavior of 600 MPa RC T-shaped columns[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(2): 148-154.
- [15] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- GUO Zhenhai, SHI Xudong. Behaviour of reinforced concrete at elevated temperature and Its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

(编辑 吴海西 沈 波)